BEUGUNGSVERSUCHE UND WELLENLÄNGENBESTIMMUNG DER RÖNTGENSTRAHLEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FACULTÄT
(II. SECTION)

DER

KGL. LUDWIGS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

VORGELEGT

VON

MAX MAIER.

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

LEIPZIG,
JOHANN AMBROSIUS BARTH.
1899.

Die folgenden Versuche mit Röntgenstrahlen wurden in meinem Privatlaboratorium unter sehr schwierigen Verhältnissen, fern von einem grösseren Physikalischen Institut und fern von einer grösseren Bibliothek, ausgeführt.

Es sei mir gestattet,

Herrn Professor Dr. von Lommel

meinen Dank auszusprechen für die freundliche Anregung zu dieser Arbeit. Ebenso erlaube ich mir,

Herrn Dr. L. Fomm,

Assistent am Physikal. Institut der kgl. Universität München,

meinen Dank abzustatten für die freundlichen Rathschläge bei meiner Arbeit.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Die Röntgenstrahlen entstehen an derjenigen Stelle der Entladungsröhre, welche von den immer senkrecht von der Oberfläche der Kathode ausgehenden Kathodenstrahlen getroffen wird; es mag nun diese Stelle wie bei den Crookes-Hittorf'schen Röhren in der Glaswand, oder wie bei den jetzt allgemein gebräuchlichen Focusröhren in der als Antikathode bezeichneten Platinplatte liegen. Von ihrem Entstehungsorte breiten sich nun die Röntgenstrahlen nach allen Richtungen des Raumes hin geradlinig aus. Aus den experimentell festgestellten Eigenschaften der Röntgenstrahlen, sich geradlinig auszubreiten, Fluorescenz zu erregen und aktinisch oder chemisch wirksam zu sein, schloss Prof. Röntgen bereits in seiner ersten Mittheilung vom December 1895 auf eine Art von Verwandschaft zwischen den neuen Strahlen und den Lichtstrahlen. Handelt es sich bei den Röntgenstrahlen um eine transversale oder longitudinale Wellenbewegung, so müssen die neuen Strahlen interferenzfähig sein.

Die Bezeichnung „Interferenzerscheinung" wird bekanntlich in einem zweifachen Sinne gebraucht. Bei den Interferenzerscheinungen in einem engeren Sinne hat man es mit Wellenflächen zu thun, die sich, durch Reflexion und Refraction nach Gestalt und Fortgang verändert, nach den Seiten unbeschränkt ausdehnen können. Da bei den Röntgenstrahlen trotz eingehender Versuche von Röntgen, Voller, Walter, Winkelmann, Straubel, Sagnac u. a. weder eine regelmässige Reflexion, noch eine Refraction nachgewiesen werden konnte, so ist man darauf angewiesen, bei den Röntgenstrahlen Interferenzerscheinungen im weiteren Sinne aufzusuchen. Diese Interferenz- oder Beugungserscheinungen entwickeln sich, wenn ein Theil der directen Strahlen durch Gegenstände an ihrem weiteren Fortgange gehindert wird, sodass die resultirende Wirkung nur noch von dem übrig bleibenden Theile der Wellen-

fläche und den von ihm ausgehenden Elementarstreifen abhängig ist.

Um bei den Röntgenstrahlen Beugungserscheinungen nachzuweisen und hieraus die Wellenlänge der neuen Strahlen zu bestimmen, wurde folgende experimentelle Arbeit ausgeführt.

Bei allen angestellten Versuchen wurde die betreffende Röntgenröhre von einem Funkeninductorium von 15 cm maximaler Schlagweite bedient. Als Stromquelle diente eine Accumulatorenbatterie — System Tudor — von fünf Zellen. In den primären Stromkreis wurde bei jedem Versuche ein Ampèremeter eingeschaltet.

Parallel zu der Röntgenröhre wurde bei jeder Beugungsaufnahme eine Funkenstrecke in den secundären Stromkreis eingeschaltet. Es geschah dieses mit Rücksicht auf die Haltbarkeit des Inductoriums und der Röntgenröhre; dann hängt aber auch, worauf bereits Prof. Röntgen aufmerksam gemacht hat[1]), die Qualität der von einer und derselben Röhre gelieferten Strahlen von einer in den secundären Kreis vor den Entladungsapparat eingeschalteten Funkenstrecke ab, indem die vorgeschaltete Funkenstrecke ähnlich wie ein Teslatransformator wirkt.

Zu den Beugungsaufnahmen dienten folgende Röntgenröhren: Drei Hittorf'sche Röhren von Geissler in Bonn, Funkenlänge 3 — 4 cm; fünf birnförmige Crookes'sche Röhren von Leybold, Funkenlänge 5 cm; Focusröhre von Leybold, Funkenlänge 4 cm; Focusröhre von Hirschmann, Funkenlänge 5 cm — ein Aluminiumring bildete die Anode! —; Focusröhre der „Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft", Funkenlänge 13 cm; regulirbare Focusröhre der „Allgemeinen Electricitätsgesellschaft", Funkenlänge 8 cm; Focusröhre von Kohl in Chemnitz mit Doppelanode und einer Funkenlänge von 10 cm; regulirbare Focusröhre von Siemens;[2]) Focusröhre von Dr. Levy mit Doppelanode und einer Funkenlänge von 12 cm; Focusröhre von Müller in Bonn, Funkenlänge 6 cm; Focusröhre von Greiner und Friedrichs, Funkenlänge 8 cm;

1) W. C. Röntgen, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin. p. 401. 1897; Wied. Ann. **64.** p. 29. 1898.

2) Abbildung dieser Röhre in L. Grätz, Die Elektricität und ihre Anwendung. Stuttgart. 7. Aufl. p. 278. 1898.

Focusröhre von Müller in Hamburg mit Doppelanode und einer Funkenlänge von 10 cm; mit einer Doppelanode versehene Focusröhre von Reiniger und Schall in Erlangen, Funkenlänge 10 cm; und eine einpolige Röntgenröhre für Teslaströme.[1])

Die Funkenlänge jeder bei den Versuchen gebrauchten Röntgenröhre wurde in der Weise bestimmt, dass während des Betriebes die Funkenständer auf die maximale Schlagweite des Inductoriums auseinandergezogen, kurz vor Beendigung des Versuches jedoch langsam so weit einander genähert wurden, bis die Entladungen zum Theil sich auch durch die Funkenstrecke ausglichen. Die dadurch sich ergebende Entfernung zwischen der positiven Spitze und der negativen Platte stellt die gesuchte Funkenlänge oder Schlagweite der betreffenden Röntgenröhre dar.

Zur Controle wurden die verschiedenen Beugungsversuche auch immer mit gewöhnlichem Lichte angestellt, das durch farbige, spectroskopisch geprüfte Glasplatten homogen gemacht wurde.

Den einfachsten Fall unter den Beugungsversuchen mit gewöhnlichem Lichte stellt die Erscheinung dar, welche eintritt, wenn ein Theil der Lichtwellen durch einen vorgestellten, für die Wellenbewegung undurchdringlichen und unbegrenzten Schirm aufgehalten wird. Man beobachtet dann von der geometrischen Schattengrenze nach Innen eine stetig und rasch abnehmende Lichtintensität, nach Aussen dagegen eine Reihe hellerer und dunklerer, paralleler Streifen, Maxima und Minima der Lichtintensität.

Um derartige Erscheinungen auch an den Röntgenstrahlen nachzuweisen, stellte ich viele Versuche an. Hierzu wurden ausschliesslich Focusröhren benutzt. Bei den Focusröhren bildet sich während des Betriebes von der im Krümmungsmittelpunkt der hohlspiegelförmigen Kathode befindlichen „Antikathode“ (Platinspiegel) aus ein Strahlenkegel, dessen Spitze in dem Platinspiegel liegt. Die aufzunehmenden Objecte werden von diesem Strahlenkegel am günstigsten bestrahlt,

1) Diese Röhre hat A. Pflüger in Wied. Ann. 60. p. 775 ff. 1897 beschrieben.

wenn die Verbindungslinie der Spitze mit der Mitte der Grundfläche des Strahlenkegels die Mitte der Objecte trifft.[1])

In diesem Strahlenkegel wurde aus der von der Höhe des Kegels senkrecht getroffenen Stelle der Glaswand der Röntgenröhre mit Hülfe eines Eisenspaltes eine Lichtlinie abgegrenzt. Der Eisenspalt war jedesmal parallel mit der Antikathode und wechselte in der Breite zwischen 0,5 und 2 mm. Hinter dem Spalt war eine 2 mm dicke Bleiplatte so aufgestellt, dass die den engen Spalt durchdringenden Röntgenstrahlen an der scharfen Kante vorbeigehen mussten. War nun z. B. die Breite der Lichtlinie oder des Spaltes 1 mm, die Entfernung der beugenden Bleikante von der Lichtlinie 118 mm und betrug die Distanz der hochempfindlichen photographischen Platte von der beugenden Kante 40 mm, so erhielt ich ein ganz scharfes Bild, auf welchem man von der geometrischen Schattengrenze weder nach Innen eine abnehmende Helligkeit, noch nach Aussen Beugungsstreifen wahrzunehmen vermag. Die Dauer der Exposition betrug 60 Secunden und die Stärke des Primärstromes war 4,5 Amp. Mit der oben beschriebenen Anordnung wurden mehrere Versuche gemacht, wobei sowohl die Röntgenröhren gewechselt als auch die Entfernungen zwischen Lichtlinie, beugende Kante und photographische Platte variirt wurden. Aber jedesmal zeigte sich dasselbe Bild.

Die Versuche wurden auch dahin abgeändert, dass die Bleiplatte zwischen der Entladungsröhre und dem Spalt aufgestellt wurde. Hinter dem Spalt befand sich dann die photographische Platte. Bei dieser Anordnung mussten die Röntgenstrahlen zuerst streifend an der Bleikante vorübergehen, dann durchdrangen sie den engen Spalt und gelangten schliesslich auf die photographische Platte. Hr. Dr. Precht hat dieselben Versuche angestellt.[2])

War bei meinen Versuchen z. B. die Breite des Spaltes

---

1) Bekanntlich betheiligen sich an der Emmission der Röntgenstrahlen auch die Wandungen der Focusröhre und die Hülfsanode, wo eine solche vorhanden ist. Wie man sich mit dem Bariumplatincyanürschirm leicht überzeugen kann, gehen auch von der Rückseite der Antikathode Röntgenstrahlen aus.

2) J. Precht, Wied. Ann. **61.** p. 355. 1897.

0,5 mm, die Entfernung der Bleikante von dem Spalt 60 mm und befand sich hinter dem Spalt in einem Abstand von 85 mm die lichtempfindliche Platte, so erhielt ich bei einer Expositionszeit von 3 Minuten und einer Intensität des Primärstromes von 4,5 Amp. einfach ein deutliches Bild des Spaltes. An der Grenze von Hell und Dunkel liessen sich Interferenzstreifen nicht beobachten.

Werden die beugenden Oeffnungen nach Grösse, Gestalt und Zahl in vielfacher Weise variirt, so entwickeln sich die verschiedenartigsten Erscheinungen, welche Schwerd auf den von Fresnel gelegten Grundlagen rein deductiv abgeleitet hat. Bei Anwendung von gewöhnlichem, aber homogen gemachtem Licht ist immer, wie beschaffen die beugenden Oeffnungen auch sein mögen, die Mitte der beobachteten Erscheinung hell; von der Mitte nach den Seiten hin entwickeln sich abwechselnd helle und dunkle Stellen, nämlich Maxima und Minima der Lichtintensität. Diese hellen und dunklen Stellen zeigen sich ganz besonders intensiv auf gewissen Richtungen, die von der Gestalt der beugenden Oeffnungen abhängen.

Es wurden nun von mir mit Beugungsöffnungen von verschiedener Form Versuche angestellt. Besondere Sorgfalt wurde darauf verwendet zu untersuchen, welche Erscheinungen wohl eintreten, wenn die Röntgenstrahlen eine feine kreisförmige Oeffnung durchdringen mussten, bevor sie auf die photographische Platte gelangen konnten. Die Lichtlinie wurde 0,5 mm breit gemacht, die Entfernung der sehr kleinen, in einer Messigplatte befindlichen kreisförmigen Oeffnung betrug 200 mm; in einer Distanz von 50 mm von der beugenden runden Oeffnung war die photographische Platte angebracht. Bei einer Expositionszeit von 60 Secunden und einer Intensität des Primärstromes von 5,0 Amp. zeigten sich auf der entwickelten photographischen Platte anstatt der kreisrunden Oeffnung feine Streifen, wie von Beugung herrührend. Diese Erscheinung konnte ich aber nur dann beobachten, wenn die Röntgenstrahlen in einer birnförmigen Crookes'schen Röhre erzeugt wurden. Bei Anwendung einer Focusröhre zeigte sich auf dem Negativ nur die sehr feine kreisförmige Oeffnung.

Auch mit sogenannten Schwerd'schen, aus ganz feinem Metalldraht eigens zu diesem Zwecke hergestellten Beugungsgittern

stellte ich viele Versuche an. War das Gitter z. B. 40 mm von der 1 mm breiten Lichtlinie entfernt, so wurde bei einer Expositionszeit von 30 Secunden und einer primären Stromstärke von 4,5 Amp. ein ganz deutliches Bild des Beugungsgitters ohne irgend welche Beugungserscheinungen erhalten. Das Bild blieb immer das gleiche, ob nun die Stäbe des Gitters parallel mit der Lichtlinie oder senkrecht zu derselben waren. Auch bei Anwendung von Kreuzgittern zeigte sich keine Beugungserscheinung. Dabei wurden die Entfernungen des betreffenden Gitters von der Lichtlinie und von der photographischen Platte, die Röntgenröhre und die Breite der Lichtlinie zwischen 0,05 mm und 1,5 mm variirt. Auf der lichtempfindlichen Platte zeigten sich aber niemals irgend welche Beugungserscheinungen.

Dieselben Bilder ohne Beugungserscheinungen wurden auch erhalten, wenn die von einem Spalt kommenden Röntgenstrahlen durch einen zweiten Spalt gehen mussten, hinter welchem sich ein Schwerd'sches Beugungsgitter befand. Hatten die Röntgenstrahlen dieses ganze System durchlaufen, so gelangten sie erst auf die photographische Platte. Hr. Sagnac hat ganz ähnliche Versuche angestellt mit negativem Erfolge.[1])

Die allermeisten und eingehendsten Beugungsversuche wurden jedoch angestellt nach der Methode, welche Hr. Dr. L. Fomm, Assistent am Physikalischen Institut der königl. Universität München, zuerst beschrieben hat.[2])

Ist nämlich die beugende Oeffnnng von zwei parallelen Geraden begrenzt, bildet die homogene Lichtquelle eine der Spaltöffnung parallele Lichtlinie und hat endlich die beugende Oeffnung eine symmetrische Lage zur Lichtquelle, so beobachtet man auf einem zum beugenden Spalt parallelen Schirm drei Fransen- oder Streifensysteme, von denen zwei zu beiden Seiten des directen Spaltbildes liegen und mit der Entfernung vom Schattenrande rasch abnehmende helle und dunkle Streifen (Fransen), die Maxima und Minima der Lichtintensität bilden, während das dritte Streifensystem innerhalb

---

1) G. Sagnac, Compt. rend. **122.** p. 783. 1896.

2) L. Fomm, Sitzungsber. d. math.-physik. Klasse d. k. b. Akad. d. Wissensch. zu München. **26.** Heft II; Wied. Ann. **59.** p. 350 ff. 1896.

des Lichtbildes entsteht. Dieses innere Streifensystem zeigt die Eigenthümlichkeit, dass bei einer bestimmten Entfernung der homogenen Lichtlinie vom beugenden Spalt und Projectionsschirm und einer bestimmten Breite des Beugungsspaltes in der Mitte des Spaltbildes ein dunkler Streifen, das erste Minimum erscheint, während sich die zu beiden Seiten der Beugungsöffnung auftretenden Streifen immer mehr gegen das Mittelbild hin zusammendrängen. Erweitert man den Beugungsspalt, so tritt an die Stelle des Minimums ein Maximum der Lichtintensität und sofort.

In zwei grossen Abhandlungen: „Die Beugungserscheinungen einer kreisrunden Oeffnung und eines kreisrunden Schirmchens“ und „Die Beugungserscheinungen geradlinig begrenzter Schirme“ [1]) führt Hr. Prof. Dr. von Lommel die beiden bekannten Fresnel'schen Integrale

$$C = \int \cos \frac{\pi}{2} v^2 \, dv$$

und

$$S = \int \sin \frac{\pi}{2} v^2 \, dv$$

auf Bessel'sche Functionen zurück und beweist, dass die Beugungserscheinungen bei geradliniger und kreisförmiger Begrenzung des beugenden Schirmes durch eine und dieselbe Formel ausgedrückt werden können.

Hr. Prof. Dr. von Lommel zeigt auch, wie man bei geradlinig begrenzten Oeffnungen aus dem Auftreten der oben beschriebenen Maxima und Minima und einiger Constanten höchst einfach die Wellenlänge des den Beugungsspalt durchdringenden homogenen Lichtes berechnen kann. Zur Berechnung der Wellenlänge λ giebt Hr. Prof. Dr. v. Lommel folgende einfache Beziehungen:

$$(\alpha) \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{a+b}{a.b},$$

$$(\beta) \qquad y = k \, . \, r^2$$

und daraus erhält man die bequeme Formel:

$$y = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{a+b}{ab} \cdot r^2 .$$

1) E. von Lommel, Abhandl. d. k. b. Akad. d. Wissensch. zu München. II. Kl. 15. Abth. II u. III. München 1884 u. 1886.

In dieser Lommel'schen Formel bedeutet λ die gesuchte Wellenlänge, a den Abstand der homogenen Lichtlinie von dem beugenden Spalt, b den Abstand des letzteren von dem Projectionsschirm, beziehungsweise bei den Versuchen mit Röntgenstrahlen den Abstand von der lichtempfindlichen photographischen Trockenplatte, r die halbe Breite des Beugungsspaltes und y eine absolute Zahl — y bildet die Ordinate eines rechtwinkeligen Coordinatensystems —, deren Grösse aus der am Schlusse der Abhandlung „Ueber die Beugungserscheinungen geradlinig begrenzter Schirme" befindlichen Fig. 1 zu entnehmen ist.

Für die Beugungsversuche, die ich nach der Methode des Hrn. Dr. Fomm anstellte, liess ich mir von Dr. Steeg und Reuter in Homburg einen geeigneten Beugungsapparat fertigen. Der Apparat besteht aus einem Messingrohr, an dessen beiden Enden je ein aus 1,5 mm dicken Stahlplatten gefertigter Spalt angebracht ist. Die beiden Spalte, von denen der eine zur Abgrenzung der Lichtlinie, der andere als beugende Oeffnung dient, sind genau einander parallel und können beliebig zueinander verschoben werden. Bei jedem der zwei Spalte ist die eine Stahlplatte fest, während die andere durch eine Mikrometerschraube verschoben werden kann, sodass man dem Spalt eine innerhalb 0 und 4 mm variable Breite zu geben vermag. Die Ganghöhe der Mikrometerschraube beträgt an jedem der zwei Spalte 1 mm, der Trommelumfang ist in 20 Theile getheilt, sodass noch eine lineare Verschiebung von 0,05 mm ganz genau abgelesen werden kann.

Hinter dem Beugungsspalt wurde bei jedem Versuche, bez. bei jeder Aufnahme die hochempfindliche photographische Platte angebracht, welche auf einem am Messingrohr des Beugungsapparates befestigtem Metallrahmen in beliebige Entfernungen vom beugenden Spalt verschoben werden konnte.

Zu den Aufnahmen benutzte ich auch einige sogenannte Röntgenplatten und Röntgenfilms (System Levy) mit doppelschichtiger, lichtempfindlicher Emulsion. Bei Anwendung solcher Platten und Films konnte die Expositionszeit bedeutend abgekürzt werden. Die zur Aufnahme benutzten Platten und Films wurden abwechselnd mit Rodinal, Hydrochinon oder auch mit Metol entwickelt.

Da die Röntgenstrahlen bekanntlich an allen Stoffen, sogar an den Theilchen der atmosphärischen Luft eine sehr starke diffuse Reflexion erfahren, so habe ich, um ganz reine Bilder zu erhalten, den Beugungsspalt und die photographische Platte durch eine grosse Bleiplatte vor der diffundirenden Strahlung geschützt. Die 50 cm lange, 40 cm breite und 0,2 cm dicke Bleiplatte hatte in der Mitte eine kreisförmige Oeffnung, in welche der zur Abgrenzung der Lichtlinie dienende Spalt mit einem Theil des Messingrohres genau passte.

Jede einzelne Aufnahme mit einer bestimmten Breite des Beugungsspaltes wurde mit verschiedenen Röntgenröhren und mit verschiedenen Expositionszeiten von einer bis fünfzig Minuten angestellt. Die Lichtlinie war bei den meisten Versuchen 0,5 mm breit. Die Breite des beugenden Spaltes wurde von 2 mm angefangen successive bei jeder neuen Versuchsreihe um einen Theilstrich auf dem Trommelumfang der Mikrometerschraube, d. h. um 0,05 mm, verringert, sodass bei der letzten Versuchsreihe die Grösse r in der oben angeführten Lommel'schen Formel gleich 0,025 mm wurde. Die Grösse a wechselte bei den verschiedenen Versuchsreihen zwischen 50 und 200 mm, die Grösse b zwischen 30 und 220 mm.

Zuerst gebrauchte ich bei den Fomm'schen Beugungsversuchen zur Erzeugung der Röntgenstrahlen ausschliesslich nur Focusröhren. Bei allen mit diesen Röhren gemachten Aufnahmen erhielt ich immer nur das genaue Bild des beugenden Spaltes; im Inneren des Spaltbildes aber war ein dunkler, dem ersten Minimum entsprechender Streifen niemals zu beobachten.

Bei einer mit der Focusröhre von Levy gemachten Aufnahme waren z. B. die Constanten folgende:

Breite der Lichtlinie = 0,5 mm, $2r = 0{,}10$ mm, $a = 150$ mm, $b = 110$ mm; die Intensität des Primärstromes betrug während der Aufnahme 4,5 Amp. und die Dauer der Expositionszeit war 2 Minuten. Senkrecht zum Beugungsspalt und in der Mitte zwischen dem letzteren und der lichtempfindlichen Platte war eine feine Nähnadel angebracht. Auf dem erhaltenen Negativ ist das Bild des Spaltes und der Nadelspitze sehr deutlich, aber ohne irgend welche Beugungserscheinung.

Wurde die Breite der Lichtlinie auf 2,0 mm vergrössert und waren die übrigen Constanten: $2r = 0{,}10$ mm, $a = 140$ mm, $b = 200$ mm, so erhielt ich bei einer Expositionszeit von zwei Minuten und einer primären Stromstärke von 4,2 Amp. ein etwas verbreitertes Bild des Spaltes ohne Interferenzstreifen.

Waren die in der Lommel'schen Formel vorkommenden Grössen folgende:

Breite der Lichtlinie = 0,5 mm, $2r = 0{,}05$ mm, $a = 180$ mm, $b = 150$ mm, die Intensität des Primärstromes gleich 4,1 Amp. und betrug die Expositionszeit 3 Minuten, so wurde mit jeder Focusröhre nur ein ganz scharfes Bild des Spaltes erhalten ohne Beugungserscheinung. Bei einer Expositionsdauer von 3 Minuten und einer Intensität des primären Stromes von 5,0 Amp. erhielt ich, wenn die Breite der Lichtlinie = 0,5 mm, $2r = 0{,}10$ mm, $a = 200$ mm, $b = 190$ mm war, nur das Bild des Beugungsspaltes.

Nachdem bei aller erdenklichen Variation der in der Lommel'schen Formel vorkommenden Grössen, wenn zur Erzeugung von Röntgenstrahlen Focusröhren verwendet wurden, Beugungserscheinungen niemals erhalten werden konnten, so änderte ich die Versuche dahin ab, dass ich in den Gang der von einer Focusröhre kommenden Röntgenstrahlen fluorescirende und absorbirende Medien brachte.

Bei den Versuchen über diffuse Reflexion der Röntgenstrahlen wurde von Winkelmann und Straubel auch der Flussspath untersucht. Derselbe zeigte die merkwürdige Eigenschaft, die Röntgenstrahlen in solche anderer Wellenlänge umzuwandeln und so ihre photochemische Intensität um das hundertfache zu verstärken. Die beiden Jenaer Physiker fanden weiter, dass auch andere Krystalle, wie Coelestin, Schwerspath, Baryt und Strontianit, die nämliche ausserordentliche Wirkung gegenüber den Röntgenstrahlen besitzen wie der Flussspath.[1])

Zu den Versuchen liess ich mir nun einen Glascylinder fertigen, der genau in die Messingröhre des Beugungsapparates passte und der an dem einen Ende geöffnet werden konnte. Dieser Glascylinder wurde mit verschiedenen Fluorescenz

1) A. Winkelmann u. R. Straubel, Wied. Ann. 59. p. 336—345. 1896.

zeigenden Körpern gefüllt [1]), z. B. mit Flussspathkrystallen, mit Lösungen von Chininsulfat, Fluorescein, Urannitrat, Eosin, mit Petroleum u. a. Bei den Beugungsaufnahmen müssten somit die von der 0,5 mm breiten Lichtlinie kommenden Röntgenstrahlen die fluorescirenden Körper durchdringen, dann erst gelangten sie durch den beugenden Spalt auf die photographische Platte. —

Die Bilder, welche bei diesen Versuchsbedingungen erhalten wurden, unterschieden sich durchaus nicht von den auf gewöhnliche Weise erhaltenen. Beugungserscheinungen waren auch bei diesen Aufnahmen nicht zu beobachten.

Die nämlichen Bilder wurden erhalten, wenn der oben beschriebene Glascylinder mit chemischen Verbindungen gefüllt war, welche die Röntgenstrahlen zum Theil absorbiren. Die Absorption der Röntgenstrahlen ist eingehend untersucht worden von Röntgen, Voller und Walter, Winkelmann und Straubel, von Zoth, Doelter, Battelli, Garbasso u. a. [2]) Bei meinen Versuchen mussten die Röntgenstrahlen verschiedene absorbirende Medien, wie Chloroform, Bromoform, ($CHBr_3$) durchdringen, bis sie zum beugenden Spalt und zur lichtempfindlichen Platte gelangen konnten. Bei diesen Versuchen war eine sehr lange Exposition nothwendig, wenn ich überhaupt ein Bild erhalten wollte.

Bei allen Versuchen mit fluorescirenden und absorbirenden Körpern wurden die in der Lommel'schen Formel vorkommenden Grössen: r, a und b ebenso variirt, wie bei den früheren Versuchen.

Nachdem alle Versuche, bei Anwendung von Focusröhren Beugungserscheinungen zu erhalten, erfolglos waren, entschloss ich mich, die früheren Versuchsreihen nochmals zu wiederholen, indem ich zur Erzeugung der Röntgenstrahlen nur

1) Ueber verschiedene fluorescirende Körper vgl. die Arbeiten von E. Lommel, Pogg. Ann. **143**. p. 26 f. 1871; **160**. p. 75 ff. 1877; Wied. Ann. **3**. p. 113 f. 1878; **8**. p. 244 f. 1879; **10**. p. 640 ff. 1880.

2) W. C. Röntgen, Wied. Ann. **64**. p. 24 ff. 1898; A. Voller u. B. Walter, l. c. **61**. p. 91 ff. 1897; A. Winkelmann u. R. Straubel, l. c. **59**. p. 330 ff. 1896; O. Zoth, l. c. **58**. p. 348 ff. 1896; C. Doelter, A. Batelli, A. Garbasso u. a., Jahrbuch der Photographie von J. M. Eder **11**. p. 110 ff. 1897.

Crookes'sche und Hittorf'sche Röhren verwendete. Von den fünf, ca. 25 cm langen, birnförmigen Crookes'schen Röhren, die von Geissler in Bonn und von Leybold in Köln bezogen waren, wurden drei während der Versuche schadhaft durch die intensive Erwärmung jener Stelle der Glaswand, auf welche die Kathodenstrahlen auffielen und die Röntgenstrahlen erzeugten. Die Versuchsanordnung blieb die gleiche wie bei den Versuchen mit den Focusröhren.

Aus der der Kathode gegenüberliegenden Stelle der Glaswand, welche die lebhafteste Fluorescenz zeigte, wurde mit Hülfe des einen Spaltes an dem früher beschriebenen Beugungsapparat eine Lichtlinie von 0,5 mm abgegrenzt. Sobald nun bei den mit einer birnförmigen Crookes'schen Röhre gemachten Aufnahmen die in der Lommel'schen Formel vorkommenden Grössen folgende waren:

$$r = 0{,}05 \text{ mm}, \quad a = 200 \text{ mm}, \quad b = 180 \text{ mm},$$

zeigte sich in dem Spaltbilde ein dunkler Streifen, das erste Minimum. Setzt man in die Lommel'sche Formel:

$$y = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{a+b}{ab} \cdot r^2$$

die Constanten des Versuches ein, so erhält man die Wellenlänge der Röntgenstrahlen

$$\lambda = \frac{2\pi}{11} \cdot \frac{380}{36000} \cdot 0{,}05^2 = \mathbf{0{,}000\,015 \text{ mm}},$$

y ist bei den Versuchen gleich 11 zu setzen. Unter denselben Versuchsbedingungen wurden die Beugungsaufnahmen von mir der Sicherheit des Resultates wegen sehr oft wiederholt, und jedesmal war im Spaltbilde der dunkle Streifen, das erste Minimum zu beobachten. Die Expositionsdauer variirte bei diesen Versuchen zwischen 5 und 10 Minuten und die Intensität des primären Stromes betrug meist 5,0 Amp.

Verwendete ich zur Erzeugung der Röntgenstrahlen eine 32 cm lange, cylinderförmige Hittorf'sche Röhre, so erhielt ich im Spaltbilde das erste Minimum, wenn

$$r = 0{,}05 \text{ mm}, \quad a = 200 \text{ mm}, \quad b = 175 \text{ mm}$$

waren. Daraus ergiebt sich wieder mit Hülfe der Lommel'schen Formel die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{2\pi}{11} \cdot \frac{375}{35000} \cdot 0{,}05^2 = \mathbf{0{,}000\,015\,3 \text{ mm}}.$$

Dieser Werth für die Wellenlänge differirt von dem vorigen mit der birnförmigen Röhre erlangten erst von der siebenten Decimalstelle an. Die aus meinen Versuchen sich ergebende Wellenlänge weist nur einen minimalen Unterschied auf von der, welche Hr. Dr. Fomm gefunden hat. Die Constanten des Fomm'schen Beugungsversuches, bei welchem das erste Minimum auftrat, waren folgende [1]):

$a = 200$ mm, $b = 200$ mm, $r = 0{,}05$ mm und $y = 11$.

Daraus ergiebt sich die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{2\pi}{11} \cdot \frac{400}{40000} \cdot 0{,}05^2 = \mathbf{0{,}000\,014\ mm}.$$

Die Länge der von Schumann unter Anwendung von Flussspathprisma, Vacuumcamera und gelatinloser Bromsilberplatte photographirten Welle im ultravioletten Spectrum beträgt 0,0001 mm!

Nachdem Hr. Dr. Fomm für die Röntgenstrahlen eine bestimmte Wellenlänge gefunden hatte, versuchten auch andere Physiker derartige Bestimmungen zu machen. Kümmell [2]) fand aus Beugungserscheinungen durch Spalte die Wellenlänge der Röntgenstrahlen zu $3300 \cdot 10^{-6}$ mm. Sagnac [3]) berechnete aus den mit Drahtgittern erhaltenen Beugungserscheinungen die Wellenlänge zu $40 \cdot 10^{-6}$ mm.

Precht fand aus den lamellaren Beugungserscheinungen die Wellenlänge zu $16 \cdot 10^{-6}$ mm, aus den nach der Fomm'schen Methode angestellten Beugungsversuchen dagegen zu $360 \cdot 10^{-6}$ mm. [4]) Tiddens fand aus Beugungsversuchen nach der Fomm'schen Methode, dass die Wellenlänge der Röntgenstrahlen näher bei $^1/_{25}\,\lambda$ liegt, wenn λ die mittlere Wellenlänge des Zirkonlichtes ist. [5]) Rowland [6]) findet aus Beugungsversuchen die Wellenlänge der Röntgenstrahlen zu 0,000 07 mm. Nach De Heen [7]) ist die Wellenlänge der Röntgenstrahlen

1) L. Fomm, Wied. Ann. **59.** p. 352. 1896.

2) G. Kümmell, Abhandl. d. naturforsch. Gesellsch. zu Halle. **21.** p. 63 f. u. 66 f. 1896.

3) G. Sagnac, Compt. rend. **122.** Nr. 13. 1896.

4) J. Precht, Wied. Ann. **61.** p. 354 ff. u. 360. 1897.

5) P. G. Tiddens, Beibl. **21.** p. 603 f. 1897.

6) H. A. Rowland, L'éclairage électrique. **9.** p. 191. 1896.

7) P. de Heen, Bull. de l'Inst. du Physique de l'Université de Liège. Aug. 1896.

gleich oder kleiner als 0,0002 mm. Gouy[1]) fand die Wellenlänge der Röntgenstrahlen viel kleiner als $^1/_{100}$ der Wellenlänge des grünen Lichtes. Voller und Walter[2]) fanden nach der Methode des Hrn. Dr. Fomm die Wellenlänge der Röntgenstrahlen gleich 0,0002 mm, dagegen nach der Helmholtz'schen Dispersionstheorie aus der Formel:

$$n^2 - 1 = -P.\lambda^2 + \frac{Q.\lambda^4}{\lambda^2 - \lambda^2_m}$$

ergab sich die Wellenlänge der Röntgenstrahlen zu

0,000 001 04 mm.[3])

Ausser den eben genannten Physikern haben noch speciell Beugungsversuche mit Röntgenstrahlen angestellt die Physiker Wood[4]), Wind[5]), Röntgen[6]) und Ercolini. Dieser letztere Physiker hat Beugungsversuche nach der Fomm'schen Methode angestellt und will aus der Beobachtung der Minima je nach den Abständen und der Breite der Spalten ganz verschiedene Wellenlängen erhalten haben.[7]) Mit feinmaschigen Drahtnetzen hat O. Müller Beugungsversuche angestellt.[8]) Bei der minimalen Wellenlänge der Röntgenstrahlen sind jedoch auch die feinmaschigsten Drahtnetze noch zu roh, um irgend welche Beugungserscheinungen zu zeigen. Mit Hülfe von verschieden gestalteten Diaphragmen hat der Physiker Bungetziano[9]) mit Röntgenstrahlen Beugungsversuche mit positivem Erfolge angestellt. Auch L. Calmette und L'Huillier erhielten bei ihren Beugungsversuchen mit zwei sehr engen Spalten helle und dunkle Interferenzstreifen.[10]) Mit Erfolg hat

1) Gouy, Beibl. **20.** p. 713. 1896.

2) A. Voller u. B. Walter, Wied. Ann. **61.** p. 98 f. 1897; Naturwissenschaftl. Rundschau **11.** p. 322 u. 213. 1896.

3) Ueber die Helmholtz'sche Dispersionstheorie vgl. A. Wüllner, Lehrbuch d. Experimentalphysik. Leipzig. 2. 4. Aufl. p. 161. 1883; H. v. Helmholtz, Vorlesungen über die Elektromagnetische Theorie des Lichtes. p. 336 ff. Leipzig. 1897.

4) R. W. Wood, Science (2) **5.** p. 585. 1897.

5) C. H. Wind, Beibl. **21.** p. 604. 1897; **22.** p. 55. 1898.

6) W. C. Röntgen, Wied. Ann. **64.** p. 10 u. 37. 1898.

7) G. Ercolini, Nuovo Cimento. (4) **5.** p. 297. 1897.

8) O. Müller, Wied. Ann. **58.** p. 771 ff. 1896.

9) Bungetziano, L'éclairage électrique. **7.** p. 165. 1896.

10) L. Calmette u. G. T. L'Huillier, Compt. rend. **122.** Nr. 16. 1896.

auch der italienische Physiker E. Villari Beugungsversuche angestellt.[1]) Sehr eingehende theoretische Untersuchungen über die Beugung der Röntgenstrahlen hat endlich der englische Physiker G. Stokes veröffentlicht.[2])

Nachdem ich bei Anwendung von Crookes'schen oder Hittorf'schen Röhren zur Erzeugung der Röntgenstrahlen Beugungserscheinungen erhalten hatte, traf ich eine andere Anordnung der Beugungsversuche mit Rücksicht auf die von Walter[3]) aufgestellte Hypothese von der Natur der Röntgenstrahlen. Ich liess die Röntgenstrahlen, bevor sie den beugenden Spalt passirten und zur photographischen Platte gelangten, durch ein Hochfrequenzfeld gehen. Das Hochfrequenzfeld wurde hergestellt durch einen Teslatransformator, welcher in den secundären Kreis eines Inductoriums von 8 cm maximaler Schlagweite eingeschaltet war. Allein das Hochfrequenzfeld äusserte keinen Einfluss auf den Gang der Röntgenstrahlen; denn es erschien bei den nämlichen Versuchsconstanten, wie bei den früheren Versuchen, in dem Spaltbilde der dunkle Streifen, das erste Minimum, sodass sich auch bei dieser Versuchsanordnung die Wellenlänge der Röntgenstrahlen $\lambda = 0{,}000\,015$ mm ergiebt. Das Resultat änderte sich nicht, wenn das Hochfrequenzfeld nach der von Lecher[4]) beschriebenen Anordnung erzeugt wurde.

Des Coudres[5]) hat durch Versuche gefunden, dass ein von den sogenannten Lenardstrahlen in freier Luft getroffenes Platinblech Röntgenstrahlen aussendet. Kupferblech wirkte noch besser. Es wäre nun höchst interessant, die auf solche Art erzeugten Röntenstrahlen nach der Methode des Hrn. Dr. Fomm auf Beugung zu untersuchen. Leider war es mir bei meinen beschränkten Hülfsmitteln nicht möglich, derartige Versuche anzustellen.

---

1) E. Villari, Rendiconti Reale Accademia dei Lincei. Ser. 5. (1) **5.** p. 445. 1896.

2) G. Stokes, Manchester Memoirs. **41.** Part. IV. 1896/97.

3) B. Walter, Wied. Ann. **66.** p. 73 ff. 1898.

4) E. Lecher, Wied. Ann. **41.** p. 850. 1890; G. Wiedemann, Die Lehre von der Elektricität. **4.** p. 389 f.; 2. Aufl. Braunschweig 1898. P. Drude, Physik des Aethers. p. 444 f. Stuttgart 1894.

5) Des Coudres, Wied. Ann. **62.** p. 139 ff. 1897.

Auch mit den nach der von Sagnac[1]) angegebenen Methode transformirten Röntgenstrahlen habe ich Beugungsversuche gemacht. Zur Umwandlung der Röntgenstrahlen benutzte ich Platten von Zinn, Zink und Aluminium. Die Anordnung bei den Versuchen wurde so getroffen, dass die Röntgenstrahlen erst dann in den Beugungsapparat und auf die lichtempfindliche Platte gelangen konnten, wie sie zuvor von der betreffenden Metallplatte reflectirt wurden. Allein, obwohl ich die Lichtlinie 1 mm breit gemacht hatte, konnte ich auch bei langdauernder Exposition nie ein deutliches Bild auf der lichtempfindlichen Platte erhalten. Auf einem vorgehaltenen Bariumplatincyanürschirm war ein schwaches Leuchten zu beobachten. Uebrigens haben Sagnac und Hurmuzescu[2]) gefunden, dass die transformirten Strahlen ein viel kleineres Durchdringungsvermögen besitzen als die directen Röntgenstrahlen.

Das Resultat meiner experimentellen Arbeit ist dieses: Die Röntgenstrahlen zeigen Interferenzerscheinungen, Beugung durch Spalte; die neuen Strahlen besitzen also Wellennatur. Aus den auftretenden Beugungserscheinungen lässt sich die Wellenlänge der Röntgenstrahlen zu 0,000 015 mm berechnen.

Aus dem Auftreten von Interferenzerscheinungen kann man noch nicht entscheiden, ob die die Röntgenstrahlen bildenden Wellen transversal oder longitudinal sind. Da bis jetzt trotz der Arbeiten von Hrn. Prof. Dr. Grätz[3]) u. a. eine Polarisation bei den Röntgenstrahlen nicht nachgewiesen ist, so bleibt die Frage nach der Transversalität und Longitudinalität der Röntgenstrahlen eine offene.

---

1) G. Sagnac, Compt. rend. **125.** p. 942. 1897; **126.** p. 40, 467 887. 1898; die Versuche Roiti's in „Nuovo Cimento". (4) **7.** p. 204. 1898.

2) G. Sagnac u. D. Hurmuzescu, L'éclairage électrique. **15.** p. 166. 1898.

3) L. Grätz, Wied. Ann. **65.** p. 453. 1898.

Curriculum vitae.

Ich, Max Maier, bin geboren am 13. August 1862 zu Dommelstadt bei Passau. Ich besuchte seit October des Jahres 1875 bis 8. August 1884 das königl. humanistische Gymnasium zu Passau, wo ich am 8. August 1884 absolvirte. Hierauf besuchte ich von October 1884 bis Juli 1888 das königl. Lyceum in Passau, woselbst ich neben dem Studium der Theologie mit ganz besonderem Eifer dem Studium der Mathematik, Physik und Chemie oblag. Am 4. November 1896 wurde ich Pfarrer von Schaufling bei Deggendorf.